

Artikel

Bolehkah Campuran Pindaan Menjadi Komponen Penting Strategi Pemulihan untuk Tanah Dilombong Arang Permukaan?

 Amanuel B. Abraha * , Eyob H. Tesfamariam dan  Wayne F. Truter

Jabatan Sains Tumbuhan dan Tanah, Universiti Pretoria, Beg Persendirian X20, Hatfield, 0028 Pretoria, Afrika Selatan * Surat-menyurat: senayabraha@gmail.com

Diterima: 27 April 2019; Diterima: 27 Jun 2019; Diterbitkan: 8 Ogos 2019



Abstrak: Pemasatan tanah menghalang pertumbuhan tumbuhan dengan menjejaskan penyusupan air secara negatif, pengudaraan tanah, akses kepada air tanah dan nutrien, dan seterusnya menyekat perkembangan akar. Kajian terdahulu untuk mengurangkan masalah sebegini dalam tanah lombong yang dipulihkan menggunakan bahan pindaan tunggal tidak memberikan penyelesaian yang tahan lama. Matlamat kajian adalah untuk mengukur peranan pindaan yang berbeza dalam mengurangkan sifat hidraulik tanah terpilih. Lima bahan pindaan tunggal dan tiga campuran pindaan yang berbeza telah dicampur dengan teliti dengan tanah lombong terdegradasi dalam nisbah 1:3 (pindaan:tanah) dan dibungkus dalam lajur. Dua tanah tambahan yang belum dipinda dengan ketumpatan pukal berbeza telah dimasukkan sebagai penanda aras. Secara amnya, penggunaan pindaan mengurangkan ketumpatan pukal (BD) sebanyak 4–20%, meningkatkan kadar penyusupan sebanyak 15–70%, meningkatkan keliangan sebanyak 5–35% dan meningkatkan air tersedia tumbuhan (PAW) sebanyak 9–33% berbanding dengan tanah yang tidak dipinda. Di antara pindaan, gabungan pindaan mengurangkan BD sebanyak 9–16%, meningkatkan kadar penyusupan sebanyak 17–59%, meningkatkan keliangan sebanyak 6–32%, dan PAW sebanyak 4–28% berbanding dengan pindaan tunggal. Kajian menunjukkan bahawa gabungan pindaan mempunyai kapasiti pemulihan tanah yang lebih baik melalui peningkatan keliangan, kadar penyusupan dan air yang ada pada tumbuhan. Oleh itu gabungan pindaan berpotensi untuk menjadi komponen yang mampan dan penting dalam strategi pemulihan untuk tanah lombong arang batu permukaan.

Kata kunci: tanah terdegradasi; pengagihan saiz liang; pepadatan tanah; pemulihan tanah; keluk pengekal air

1. Pengenalan

Perlombongan arang batu bertanggungjawab untuk jumlah besar degradasi tanah melalui penyingkiran kuantiti besar tanah atas dan bawah tanah [1]. Proses sedemikian telah ditunjukkan memberi kesan negatif kepada sifat fizikal [2] dan kimia [3] tanah, dan seterusnya potensi pengeluaran tumbuhan tanah selepas penambakan tanah [4]. Sifat fizikal tanah mempengaruhi pertumbuhan tumbuhan dalam dua cara utama: Pemasatan dan seterusnya ketersediaan air tanah. Peningkatan pepadatan tanah mengakibatkan kadar penyusupan yang berkurangan, dengan itu mengurangkan taburan hujan yang berkesan sambil meningkatkan larian permukaan dan hakisan air [5]. Jumlah keliangan, yang merujuk kepada isipadu lompong tanah yang boleh diisi oleh air dan/atau udara, juga dipengaruhi oleh pepadatan tanah kerana ia berkaitan secara songsang dengan kepadatan pukal [6]. Jumlah keliangan tanah diagihkan di antara kelas saiz liang yang berbeza, yang memenuhi peranan yang berbeza dalam pengudaraan, penyusupan, saliran, dan penyimpanan air dan rintangan mekanikal yang ditawarkan kepada pertumbuhan akar. Kadar penyusupan dikawal oleh kesinambungan liang atau laluan [7]. Selain mengurangkan kadar penyusupan, pepadatan mempengaruhi taburan saiz liang (PSD) sesuatu tanah [8]. Akibatnya, ketersediaan air tumbuhan akan terjejas. Perubahan dalam jumlah keliangan adalah berkaitan dengan perubahan dalam JPA. Tanah dengan julat taburan saiz liang yang luas mengekalkan air untuk jangka masa yang lebih lama menjadikannya sesuai untuk pertumbuhan tumbuhan berbanding dengan tanah dengan taburan saiz liang yang sempit terutamanya di kawasan yang hujan tidak menentu [9]. Penambahan pindaan organik

tanah terdegradasi mempunyai hasil yang positif dengan menyediakan persekitaran yang kondusif untuk aktiviti biologi, menjadi sumber bahan organik dan nitrogen sambil meningkatkan sifat fizikal tanah seperti ketumpatan pukal dan keliangan [10]. Dalam percubaan yang dijalankan oleh Ozores-Hampton et al. [11], kesan penggunaan jangka panjang pindaan organik telah dikaji dan membuat kesimpulan bahawa ia boleh meningkatkan fizikal (mengurangkan ketumpatan pukal, meningkatkan kapasiti pegangan air, dan sifat hidraulik tanah), kimia (meningkatkan OM tanah, C, pH, dan ECE), dan sifat biologi (keseluruhan aktiviti mikrob tanah) tanah.

Pelbagai pengarang telah melakukan kajian yang meluas untuk menangani pemulihan tanah terdegradasi menggunakan pindaan tanah yang berbeza [12-14]. Kajian yang dijalankan di Swaziland oleh Cele dan Maboeta [12] menunjukkan peningkatan ketara dalam kapasiti pegangan air tanah lombong besi yang dirawat dengan bio-pepejal. Satu lagi kajian oleh Yazdanpanah et al. [13] juga menunjukkan bahawa penggunaan sisa pepejal terkompas meningkatkan pecahan makro-liang tanah, membawa kepada kekonduksian hidraulik yang lebih besar. Dalam kebanyakan kes, kesan pindaan ini adalah jangka pendek (setahun atau dua tahun). Ini terutamanya disebabkan oleh penguraian pindaan organik semasa tahun pertama permohonan [15]. Strategi semasa yang digunakan oleh industri perlombongan Afrika Selatan untuk memulihkan tanah menggunakan pengapuran dan pembajaan tidak memberikan masa yang cukup untuk tanah memulihkan fungsi tanah fizikal, kimia dan mikrob ke tahap yang boleh diterima untuk tumbuh-tumbuhan tumbuh secara mampan [4]. Kajian ini bertujuan untuk mencari pindaan organik atau gabungan pindaan yang boleh menambah baik dan mengekalkan sifat hidraulik tanah untuk jangka masa yang lebih lama sambil masih menjadi sumber bahan organik kepada fauna makro dan mikro, yang memainkan peranan penting dalam pemulihan tanah.

Untuk pengetahuan kami, sedikit yang dilakukan untuk mengenal pasti bahan pindaan tanah tahan lama yang boleh menambah baik dan mengekalkan sifat fizikal dan kimia tanah agar tahan lebih lama, yang penting untuk penubuhan dan pertumbuhan tumbuh-tumbuhan. Dalam kajian ini, kami membuat hipotesis bahawa penambahan campuran pindaan akan meningkatkan sifat fizikal tanah berbanding dengan pindaan tunggal. Matlamat keseluruhan kajian adalah untuk mengukur kesan satu pindaan (baja sahaja, rawatan lombong standard, kompos sahaja, lucerne sahaja, dan rumput sahaja) dan gabungan pindaan (rumput + baja, rumput + kompos, dan lucerne + baja + kompos) berbanding dengan tanah lombong yang tidak dipinda pada ketumpatan pukal, keliangan, penyusupan, dan taburan saiz liang tanah lombong terdegradasi.

2. Bahan-bahan dan cara-cara

2.1. Tapak Kajian dan Rawatan

Untuk menyiasat kesan pelbagai pindaan tanah ke atas sifat hidraulik tanah terpilih bagi tanah lombong terdegradasi, dua kajian selari telah dijalankan; percubaan lajur makmal tanpa tumbuhan dan percubaan lapangan dengan pindaan serupa di mana rumput ditanam. Kajian ini melaporkan percubaan lajur makmal dan bertujuan untuk menentukan kesan rawatan sahaja tanpa sumbangan daripada

sisa tumbuhan dan akar. Kajian makmal dua tahun itu dijalankan di makmal fizik tanah Universiti Pretoria, Pretoria, Afrika Selatan. Tanah (77% pasir, 6% kelodak dan 17% tanah liat) adalah tanah liat berpasir Hutton [16] (lempung, kaolinit, mesic, Typic Eutruxox) dengan pH dalam air 5.18 dan %C 0.96. Tanah itu diperoleh daripada lombong arang batu permukaan di Mpumalanga, Afrika Selatan. Atas sebab kerahsiaan, lokasi sebenar dan nama lombong tidak boleh didedahkan. Untuk mengelakkan kesan negatif penimbunan tanah yang berpanjangan, tanah atas yang baru dilucutkan telah digunakan. Sifat fizikal dan kimia awal tanah sebelum pelucutan tidak ditentukan kerana tapak itu hanya boleh diakses selepas penimbunan tanah atas.

Rawatan itu termasuk tanah bercampur dengan baja lembu (L1), rawatan lombong tempatan standard pengapuran dan pembajaan (SMT) (L2), serpihan kayu kompos (L3), jerami lucerne cincang (L4), rumput pastura cincang (L5), campuran rumput pastura cincang dan baja lembu (L6), campuran rumput pastura cincang dan serpihan kayu kompos (L7), campuran jerami lucerne cincang, baja lembu dan serbuk kayu kompos (L8). Dua tanah tambahan yang belum dipinda (L9 dan L10) telah dimasukkan sebagai penanda aras. Rawatan (L9) dibungkus dengan cara yang sama seperti pindaan lain dan yang kedua, rawatan (L10) dibungkus kepada ketumpatan pukal permulaan 1.6 g cm^{-3} yang mencerminkan tanah yang dipadatkan di lama

kawasan yang dipulihkan. Purata panjang rumput cincang dan lucerne adalah antara 2.5–3.5 cm manakala saiz baja dan kompos ialah 1.5–2.5 cm. SMT terdiri daripada campuran baja yang digunakan pada kadar 65 kg N ha⁻¹ (dalam bentuk ammonium nitrat batu kapur), 203 kg P ha⁻¹ (dalam bentuk super fosfat) dan 134 kg K ha⁻¹ (dalam bentuk kalium klorida) dan kapur dolomit (4 tan ha⁻¹). Pindaan tanah telah dicampur dengan teliti dengan tanah terlebih dahulu dalam nisbah 1:3 (pindaan:tanah) berdasarkan isipadu mengikut prosedur yang diikuti oleh strategi pemulihan lombong Afrika Selatan [17]. Semua rawatan telah dibungkus ke tiang tanah Plexiglas (diameter dalaman 0.1 m dan ketinggian 0.3 m) hingga kedalaman 0.25.

Tiang tanah Plexiglas diletakkan di atas dasar polistirena kejuruteraan yang disediakan dengan lubang di bahagian tengah bawah untuk pengumpulan larut lesap. Dua bahan penapis diletakkan di atas dasar polistirena untuk mengekalkan tanah di dalam tiang tanah sambil membenarkan larutan tanah larut lesap. Tapak polistirena disambungkan kepada tiub sedutan dan botol Schott untuk mengumpul larutan yang dikeringkan. Tanah yang dipinda kemudiannya dibungkus pada ketinggian 0.25 m berdasarkan isipadu dengan mengetuk bangku secara berterusan. Kajian telah dibentangkan dalam reka bentuk blok rawak sepenuhnya (CRBD) dengan sepuluh rawatan empat replikasi. Selepas pembungkusan, semua lajur menerima satu isipadu liang air sekali seminggu yang dikira daripada ketumpatan pukal dan keliangan. Air digunakan untuk mewakili musim hujan di kawasan Pretoria selama empat bulan [18] dan tiada air digunakan untuk lapan bulan berikutnya untuk mewakili musim kemarau. Strategi penggunaan air yang sama telah diikuti untuk tahun kedua kajian. Jumlah air yang digunakan untuk mendapatkan satu isipadu liang bagi setiap rawatan telah diselaraskan secara berterusan berdasarkan kepadatan pukal yang dikira masa sebenar. Ketumpatan pukal tanah (BD) dikira daripada berat tanah kering ketuhar dan jumlah isipadu tanah. Keliangan ditentukan daripada ketumpatan pukal kering dan ketumpatan zarah, diandaikan sebagai 2.65 g cm⁻³.

2.2. Penyusupan dan Kekonduksian Hidraulik

Infiltrometer cakera mini, (Campbell Pacific Nuclear, California, USA) dengan jejari cakera 2.25 cm, digunakan untuk mengira kadar penyusupan dan kekonduksian hidraulik tak tepu (K) pada kepala tekanan sedutan 2 cm. Ini dilakukan dua kali setahun (Jun dan Disember) dalam tempoh dua tahun. Data yang dikumpul dalam setiap lajur digunakan untuk menentukan kadar penyusupan air tanah.

Kekonduksian hidraulik tanah dalam lajur kemudiannya dikira menggunakan kaedah Zhang [19].

Kaedah ini memerlukan mengukur penyusupan kumulatif berbanding masa dan menyesuaikan keputusan dengan fungsi (Persamaan (1)):

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t}, \quad (1)$$

di mana C_1 (L T⁻¹) dan C_2 (L T^{-1/2}) masing-masing adalah parameter yang berkaitan dengan kekonduksian hidraulik dan penyerapan tanah, I (L) ialah penyusupan terkumpul, dan t (T) ialah masa. Kekonduksian hidraulik tanah (K) kemudiannya dikira daripada (Persamaan (2)):

$$K(h) = \frac{C_1}{A}, \quad (2)$$

dengan C_1 ialah cerun lengkung penyusupan terkumpul berbanding punca kuasa dua masa, dan A ialah nilai ($A = 4.2529$) yang berkaitan dengan parameter van Genuchten [20] untuk jenis tanah tertentu kepada kadar sedutan dan jejari cakera infiltrometer (Manual meter infiltrometer cakera mini).

2.3. Lengkung Penahan Air Tanah dan Taburan Saiz Liang

Selepas dua tahun kajian kitaran basah dan kering, sampel teras tanah yang merosakkan telah diambil dari setiap rawatan pada dua peringkat, lapisan atas (0-5 cm) dan lapisan bawah (di bawah 5 cm) berdasarkan perubahan ketara dalam pemadatan yang dilihat, melalui tiang tanah Plexiglas. Setelah lapisan atas (0–5 cm) dialihkan, ukuran kekonduksian hidraulik diambil pada lapisan bawah (di bawah 5 cm) dan dibandingkan dengan bacaan kekonduksian hidraulik lapisan atas. Sampel teras tanah bagi kedua-dua lapisan (lapisan atas dan bawah) kemudiannya dibasahi melalui kapilari hingga tepu selama 48 jam. Matrik

ukuran potensi (ψ_m) dan kandungan air isipadu (ψ) yang sepadan telah dikumpul di berikutan kepala tekanan (h) 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 33, 50, dan 100 kPa menggunakan sel aliran kawalan dan 200, 300, 500, 700, dan 1000 kPa menggunakan plat tekanan. Keluk pengekal air tanah (SWRC) telah dibangunkan menggunakan persamaan van Genuchten (Persamaan (3)) program RETC [21] dengan sekatan Mualem ($m = 1 - \psi / n$) [22] daripada bacaan kandungan air isipadu yang dikumpul pada pelbagai bacaan potensi matrik.

$$\psi(h) = \psi_r + (\psi_s - \psi_r) [1 + (\psi/h)^n]^{-m}, \quad (3)$$

di mana ψ_r dan ψ_s masing-masing adalah baki dan kandungan air tanah tepu, h ialah potensi air tanah kepala dan ψ , n , dan m adalah parameter empirikal yang mengawal bentuk Keluk Pengekal Air Tanah (SWRC). Fungsi kapasiti hidraulik (C_w) kemudiannya diperolehi daripada SWRC, yang mewakili kecerunan SWRC, menggunakan Persamaan (4).

$$C_w(h) = \frac{a_n (\psi_s - \psi_r) m n (\psi/h)^{n-1}}{[1 + (\psi/h)^n]^{m+1}}, \quad (4)$$

Kepala tekanan air ditukar kepada jejari liang (r) menggunakan hubungan $r = 1490/j$, dengan r dan h diberikan dalam μm dan cm , masing-masing [23]. Pengagihan saiz liang yang disyorkan oleh Luxmoore [24], yang Liang-liang dikategorikan kepada tiga kelas: Liang-makro ($>1000 \mu\text{m}$ diameter), liang meso ($10\text{--}1000 \mu\text{m}$ diameter), dan liang mikro ($<10 \mu\text{m}$ diameter) telah digunakan.

2.4. Analisis Statistik

Jika berkenaan, Kemungkinan Maksimum Terhad (REML), atau model campuran linear, diulang analisis ukuran digunakan pada ketumpatan pukal selama lima tarikh setiap enam bulan, dan pada kekonduksian hidraulik tak tepu lebih empat tarikh setiap enam bulan menguji perbezaan antara 10 rawatan, bulan dan rawatan mengikut kesan interaksi bulan, membenarkan perubahan dalam variasi berbulan-bulan. Min dibandingkan menggunakan julat Tukey's Studentized (HSD) ($p < 0.05$), sebagai varians adalah heterogen [25]. Data dianalisis menggunakan program statistik GenStat® [26]. Keliangan dianalisis menggunakan ANOVA piawai bagi program Sistem Analisis Statistik (SAS) untuk Windows (versi 9.3, SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA).

3. Keputusan

3.1. Ketumpatan pukal

Memandangkan lajur telah dibungkus mengikut volum, ketumpatan pukal semua rawatan berbeza pada permulaan perbicaraan. Apabila data digabungkan untuk kedua-dua tahun, terdapat signifikan ($p < 0.01$) bulan x interaksi rawatan untuk ketumpatan pukal (Jadual 1). Bulan x interaksi rawatan menunjukkan secara amnya kedudukan ketumpatan pukal yang serupa bagi rawatan pindaan tanah bagi setiap tahun. Ini menunjukkan bahawa interaksi itu disebabkan terutamanya oleh perbezaan ketumpatan pukal magnitud antara tahun. ini interaksi berlaku terutamanya kerana ketumpatan pukal meningkat dengan masa (Jadual 2).

Jadual 1. Ringkasan ANOVA tentang darjah kebebasan, nilai F dan kebarangkalian F untuk analisis varians untuk ketumpatan pukal tanah (ujian julat Terpelajar Tukey) di Universiti Pretoria, Afrika Selatan.

Sumber Variasi	df †	nilai F	F > pr
bulan	4	614.74	<0.01
Rawatan	9	241.68	<0.01
Bulan*rawatan	36	11.89	<0.01

† df, darjah kebebasan.

Jadual 2. Kesan rawatan ke atas purata ketumpatan pukal (g cm³) sepanjang tempoh kajian.

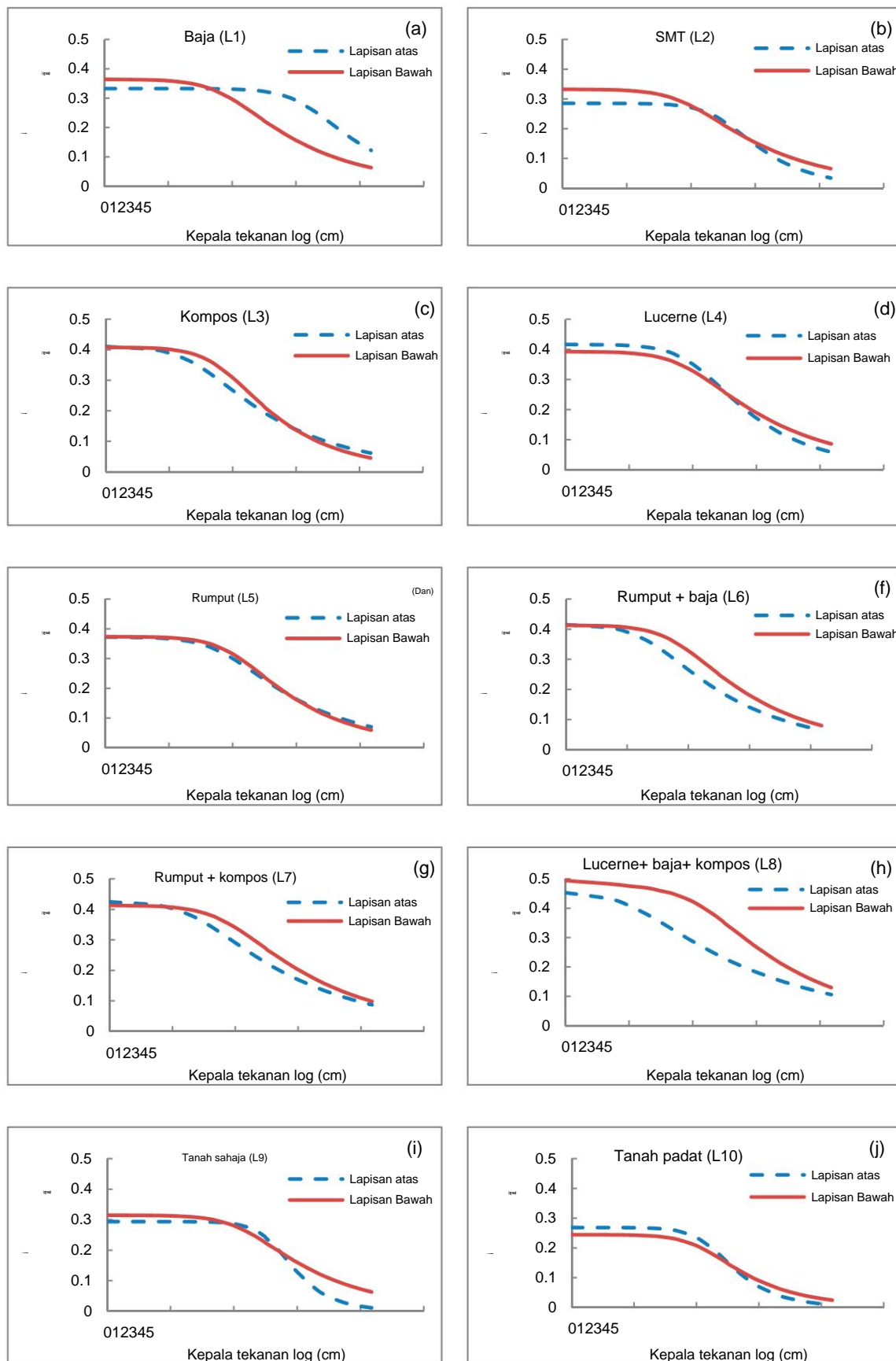
Rawatan	Dis 2013 Jun 2014 Dis 2014 Jun 2015 Dis 2015				
	Baja (L1)	1.37 b	1.41 c	1.45 c	1.48 de
Rawatan lombong standard (L2)	1.35 b	1.37 b	1.39 b	1.42 bc	1.42 bc
Kompos (L3)	1.41 c	1.43 c	1.45 cd	1.47 de	1.49 daripada
Lucerne (L4)	1.40 c	1.42 c	1.43 c	1.45 cd	1.46 cd
Rumput (L5)	1.45 d	1.47 d	1.48 de	1.50 ef	1.51 dan
Rumput + baja (L6)	1.35 b	1.37 b	1.38 b	1.40 b	1.40 b
Rumput + kompos (L7)	1.35 b	1.37 b	1.37 b	1.38 b	1.38 b
Lucerne + baja + kompos (L8)	1.21 a	1.22 a	1.24 a	1.26 a	1.26 a
Tanah sahaja (L9)	1.44 d	1.47 d	1.50 dan	1.53 f	1.56 f
Tanah padat (L10)	1.60 dan	1.60 dan	1.60 f	1.68 g	1.69 g
SEM	0.0062	0.0068	0.0077	0.0083	0.0086

Bermakna dengan huruf yang sama dalam lajur tidak jauh berbeza.

Antara rawatan, rawatan L8 (lucerne + baja + kompos) mempunyai ketumpatan pukal yang paling rendah dalam setiap tahun. Bacaan ketumpatan pukal untuk rawatan L8 ialah 11.5%, 12.3%, 12.1%, 12.7%, dan 12.7% lebih rendah daripada L2 (rawatan lombong standard) sepanjang lima tarikh pensampelan. Rawatan yang lain yang mengekalkan ketumpatan pukal yang agak rendah berbanding dengan rawatan lombong standard adalah L6 (rumput + baja) dan L7 (rumput + kompos), walaupun nilai awal yang sama. Namun, perbezaannya tidak berbeza secara statistik. Sebaliknya, ketumpatan pukal rawatan baja (L1) adalah 1.4%, 2.9%, 4.3%, 4.2% dan 6.3% lebih tinggi daripada L2 (rawatan lombong standard) ke atas lima persampelan tarikh. Dapat diambil perhatian bahawa pada tarikh persampelan pertama (Dis 2013), perbezaannya tidak secara statistik ketara (Jadual 2). Pada akhir tempoh kajian dua tahun, ketumpatan pukal rawatan baja (L1) meningkat daripada 1.37 g cm³ kepada 1.51 g cm³, dan peningkatan tertinggi ialah 10.4%. Yang kedua tertinggi peningkatan sebanyak 7.8% dalam ketumpatan pukal diperhatikan dalam rawatan tanah sahaja, di mana tiada pindaan telah ditambah. Yang menghairankan, rawatan kompos (L3), lucerne (L4), dan rumput (L5) mencatatkan pukal ketumpatan lebih tinggi daripada rawatan lombong standard (L2). Ini sama sekali tidak dijangka sebagai pindaan bahan dalam rawatan ini adalah bahan kasar, mempunyai isipadu yang ringan, tetapi lebih besar.

3.2. Keluk Pengekalan Air Tanah dan Keliangan Jumlah

Keluk pengekalan air tanah untuk semua rawatan ditunjukkan dalam Rajah 1 dan parameter yang dipasang untuk persamaan van Genuchten menggunakan program RETC untuk lapisan atas dan bawah ditunjukkan dalam Jadual 3. Kandungan air isipadu tepu adalah tertinggi bagi tanah yang dirawat dengan campuran pindaan, iaitu L8 (0.457 m³ m⁻³ lapisan atas; 0.494 m³ m⁻³ lapisan bawah), diikuti oleh L7 (0.426 m³ m⁻³ lapisan atas; 0.413 m³ m⁻³ lapisan bawah) dan L6 (0.417 m³ m⁻³ lapisan atas; 0.414 m³ m⁻³ lapisan bawah) rawatan (Jadual 3). Semua rawatan lain mempunyai kandungan air isipadu tepu kurang daripada 0.40 m³ m⁻³ dengan nilai terendah yang direkodkan untuk rawatan padat, L10, (0.269 m³ m⁻³ lapisan atas; 0.244 m³ m⁻³ lapisan bawah), yang mewakili ketumpatan pukal kebanyakan tanah lombong yang telah dipulihkan, diikuti oleh tanah sahaja dibiarkan mengendap secara semula jadi, L9, (0.294 m³ m⁻³ lapisan atas; 0.314 m³ m⁻³ lapisan bawah), dan lombong standard rawatan, L2, (0.285 m³ m⁻³ lapisan atas; 0.322 m³ m⁻³ lapisan bawah). Nilai kemasukan udara (hA) bagi rawatan baja (L1) adalah lebih tinggi pada lapisan atas berbanding lapisan bawah (Rajah 1a). Kemasukan udara nilai (hA) kedua-dua lapisan dalam rawatan L2, L9, dan L10 juga tinggi (Rajah 1b, i, j). Loji tersedia air (PAW) adalah tertinggi dalam rawatan yang diperbaiki dengan campuran pindaan (L6, L7, dan L8) untuk kedua-dua lapisan (Jadual 3), manakala rawatan L2, L9, dan L10 mencatatkan PAW terendah.



Rajah 1 Keupayaan kepala baja lapisan atas dan bawah SMT (a) baja, (b) buagan, (c) buagan standard (SMT), (d) kompos, (e) lucerne, (f) campuran rumput dan baja, (g) campuran rumput dan kompos, (h) campuran lucerne, baja dan kompos, (i) tanah sahaja dan (j) tanah yang dipadatkan.

Jadual 3. Sifat tanah dan parameter yang dipasang untuk persamaan Van Genuchten menggunakan program RETC untuk kedua-dua lapisan.

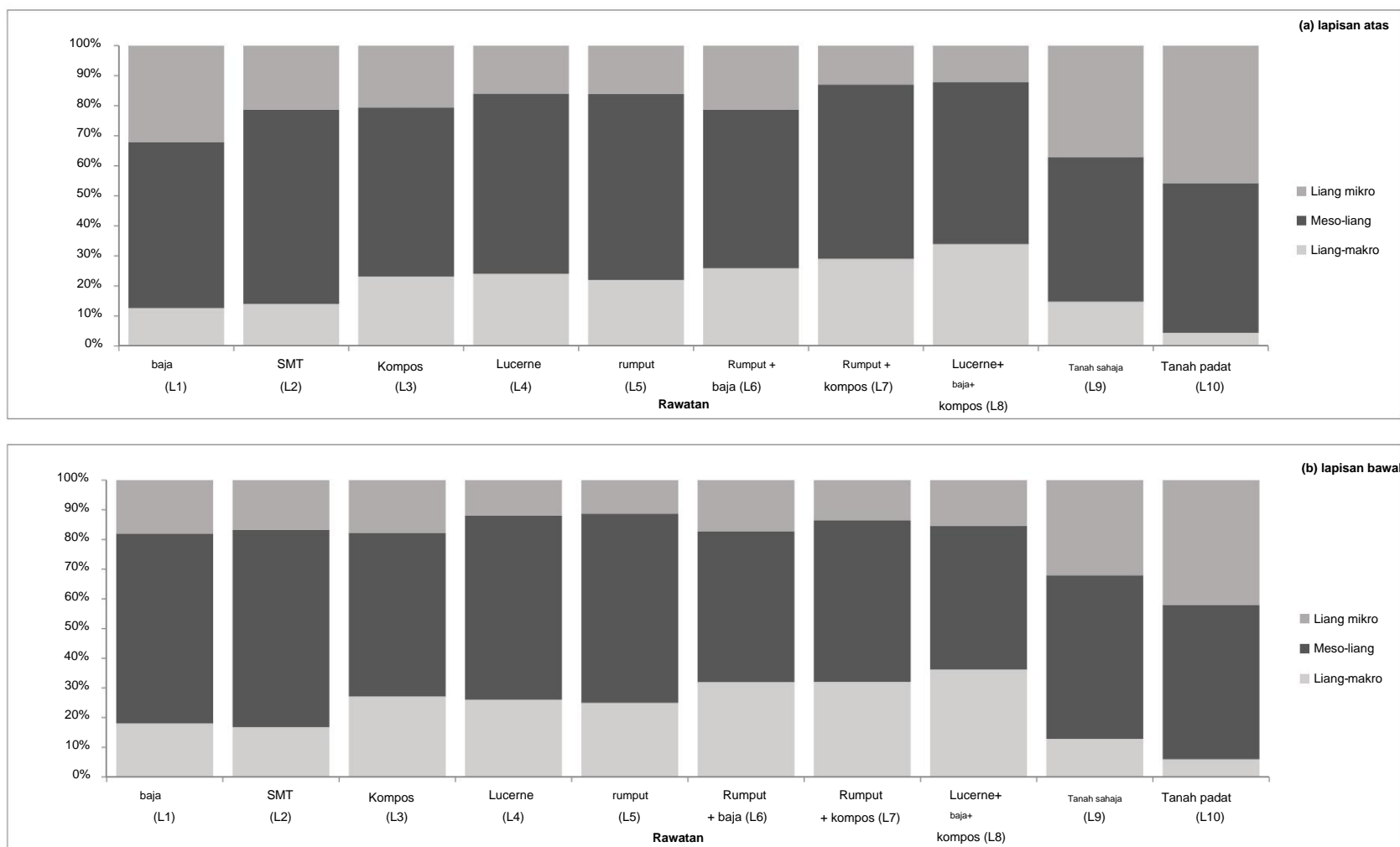
Rawatan	Lapisan						Lapisan Bawah						r^2	
	Atas \bar{y}_r (m ³ m ⁻³)	\bar{y}_s (m ³ m ⁻³)	\bar{y} (m ³ m ⁻³)	n	m PAW (mm m ⁻¹)	z_r	\bar{y}_r (m ³ m ⁻³)	\bar{y}_s (m ³ m ⁻³)	\bar{y} (m ³ m ⁻³)	n	m PAW (mm m ⁻¹)			
Baja (L1)	0.1	0.333	0.860	1.436	0.304	91	0.95	0.1	0.364	0.293	1.338	0.253	94	0.98
Rawatan lombong standard (L2)	0.1	0.295	0.651	1.558	0.358	89	0.94	0.1	0.322	0.182	1.318	0.242	97	0.96
Kompos (L3)	0.1	0.412	0.088	1.301	0.232	110	0.97	0.1	0.408	0.092	1.412	0.292	110	0.98
Lucerne (L4)	0.1	0.416	0.538	1.403	0.287	106	0.98	0.1	0.393	0.491	1.303	0.227	101	0.97
Rumput (L5)	0.1	0.372	0.362	1.316	0.240	102	0.97	0.1	0.373	0.318	1.352	0.273	105	0.97
Rumput dan baja (L6)	0.1	0.417	0.094	1.288	0.224	119	0.98	0.1	0.414	0.157	1.294	0.233	115	0.98
Rumput dan kompos (L7)	0.1	0.426	0.059	1.247	0.198	113	0.96	0.1	0.413	0.089	1.269	0.212	111	0.97
Lucerne, baja dan kompos (L8)	0.1	0.457	0.048	1.201	1.201	124	0.95	0.1	0.494	0.080	1.273	0.275	130	0.82
Tanah sahaja (L9)	0.1	0.284	0.839	0.164	1.640	82	0.98	0.1	0.314	0.676	0.273	0.215	89	0.95
Tanah padat (L10)	0.1	0.269	0.769			76	0.98	0.1	0.244	0.527			72	0.97

3.3. Taburan Saiz Liang

Keputusan taburan saiz liang bagi rawatan yang berbeza ditunjukkan dalam Rajah 2 dan 3. Dalam semua rawatan, adalah jelas bahawa liang meso mendominasi jumlah keliangan yang merangkumi 50 hingga 66% daripada jumlah keliangan (Rajah 2). Secara amnya, penambahan pindaan mengurangkan bahagian liang mikro sebanyak 40% pada lapisan atas (Rajah 2a) dan 50% pada lapisan bawah (Rajah 2b) lajur tanah. Penurunan adalah lebih tinggi dalam gabungan pindaan (L6, L7, dan L8), di mana bahagian liang mikro berkurangan lebih daripada 60% berbanding dengan rawatan yang tidak dipinda. Penurunan yang diperhatikan dalam bahagian liang mikro dalam rawatan yang dipinda adalah disebabkan terutamanya oleh peningkatan relatif dalam bahagian liang makro dan meso. Penggunaan campuran pindaan (L6, L7 dan L8) meningkatkan bahagian liang makro sebanyak 125% (min lapisan atas (UL) dan lapisan bawah (LL)) dan 530% (min UL dan LL) berbanding dengan L9 dan L10, masing-masing. Manakala penggunaan pindaan tunggal (L3, L4, dan L5) meningkatkan perkadaran liang makro sebanyak 75% (min UL dan LL) dan 390% (min UL dan LL) masing-masing berbanding L9 dan L10. Begitu juga, penggunaan pindaan meningkatkan bahagian liang meso sebanyak 19% (pindaan tunggal) dan 3% (pindaan campuran) berbanding dengan tanah yang tidak dipinda (L9 dan L10). Jelas daripada kajian ini bahawa penggunaan pindaan memainkan peranan penting dalam meningkatkan bahagian liang makro sambil merendahkan pecahan liang mikro. Antara rawatan yang dipinda, L8 mempunyai bahagian makro-liang tertinggi (35%, min UL dan LL) manakala L1 dan L2 mempunyai paling sedikit (16% min UL dan LL). Perkadaran liang makro dalam tanah yang belum dipinda ialah 14% (min UL dan LL) untuk rawatan tanah sahaja (L9) dan 5% (min UL dan LL) untuk rawatan tanah padat (L10). Perkadaran liang makro dalam lapisan bawah setiap rawatan yang dipinda (L1 hingga L8) adalah lebih tinggi daripada lapisan atas.

3.4. Penyusupan dan Kekonduksian Hidraulik

Apabila data digabungkan untuk kedua-dua tahun, terdapat interaksi rawatan x bulan yang signifikan ($p < 0.01$) untuk penyusupan kumulatif (Jadual 4). Interaksi rawatan bulan x menunjukkan kedudukan penyusupan kumulatif yang sama secara amnya bagi rawatan pindaan tanah bagi setiap tahun (Jadual 5). Ini menunjukkan bahawa interaksi itu disebabkan terutamanya oleh perbezaan penyusupan kumulatif magnitud antara tahun. Dengan pengecualian rawatan L2, semua pindaan meningkatkan penyusupan kumulatif dua kali dan lebih tinggi daripada tanah yang tidak dipinda (L9 dan L10). Lajur yang dirawat dengan campuran pindaan mencatatkan penyusupan terkumpul tertinggi ($p < 0.01$) melebihi 4 cm, dengan rawatan L8 (Lucerne + baja + kompos) merekodkan penyusupan tertinggi ($p < 0.01$) sebanyak 4.94 cm.



Rajah 2. Taburan saiz liang bagi rawatan yang berbeza dibahagikan kepada liang mikro, liang meso dan liang makro. SMT = Rawatan lombong standard.
SMT = Rawatan lombong standard.

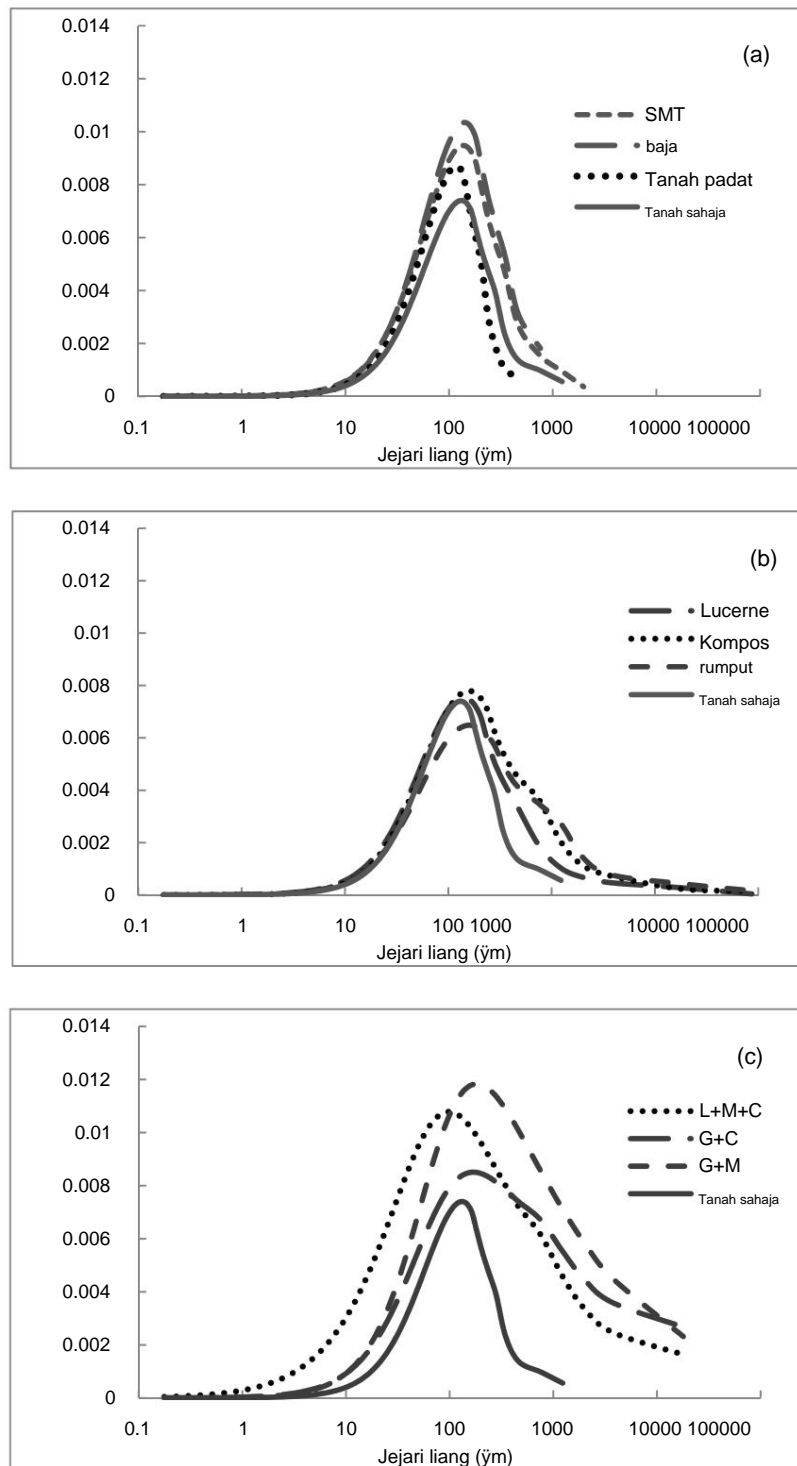


Fig. 3. Taburan saiz liang bagi rawatan berbeza yang diperolehi menggunakan kapasiti hidraulik fungsi (Cw) berbanding dengan rawatan tanah sahaja. SMT = rawatan lombong standard, G+M = campuran rumput pastura dan baja, G+C = campuran rumput pastura dan kompos, L+M+C = campuran lucerne, baja dan kompos. (a) baja, rawatan lombong standard (SMT), dipadatkan tanah dan tanah sahaja, (b) lucerne, rumput kompos dan tanah sahaja, dan (c) campuran rumput dan baja (G + M), campuran rumput dan kompos (G + C), campuran lucerne, baja dan kompos (L + M + C) dan tanah sahaja.

Jadual 4. Ringkasan ANOVA tentang darjah kebebasan, nilai F dan kebarangkalian F untuk analisis varians untuk penyusupan kumulatif (ujian julat Pelajar Tukey) di Universiti Pretoria, Afrika Selatan.

Sumber Variasi	df †	Nilai F	F > pr
bulan	3	118.84	<0.01
Rawatan	9	672.90	<0.01
Bulan*rawatan	27	4.54	<0.01

† df, darjah kebebasan.

Jadual 5. Kesan rawatan ke atas penyusupan kumulatif (cm) sepanjang tempoh kajian.

Rawatan	Jun 2014	Dis 2014	Jun 2015	Dis 2015
Baja (L1)	3.12 c	2.96 d	2.88 d	2.83 d
Rawatan lombong standard (L2)	1.80 d	1.74 dan	1.71 dan	1.69 dan
Kompos (L3)	2.98 c	2.93 d	2.85 d	2.82 d
Lucerne (L4)	1.40 c	3.86 c	3.80 c	3.74 c
Rumput (L5)	2.94 c	2.89 d	2.85 d	2.83 d
Rumput + baja (L6)	4.16 b	4.13 b	4.10 b	4.06 b
Rumput + kompos (L7)	4.12 b	4.09 bc	4.04 bc	4.02 b
Lucerne + baja + kompos (L8)	4.94 a	4.91 a	4.88 a	4.85 a
Tanah sahaja (L9)	1.49 e	1.47 f	1.44 f	1.42 f
Tanah padat (L10)	0.70 f	0.69 g	0.68 g	0.68 g
SEM	0.1552	0.1415	0.1581	0.1575

Bermakna dengan huruf yang sama dalam lajur tidak jauh berbeza.

Kekonduksian hidraulik tanah boleh menunjukkan kadar penyusupan air apabila digunakan pada a bidang atau jenis tanah tertentu. Pengukuran menggunakan infiltrometer cakera mini pada sedutan 2 cm menunjukkan bahawa kekonduksian hidraulik adalah ketara ($p < 0.01$) lebih tinggi untuk rawatan L1, dan L4-L8 berbanding dengan rawatan L9 dan L10 yang tidak dipinda (Jadual 6). Kekonduksian hidraulik untuk rawatan ini adalah lebih daripada 2.4 kali lebih tinggi daripada L9 dan lebih daripada 14 kali lebih tinggi daripada L10.

Jadual 6. Kesan rawatan ke atas kekonduksian hidraulik min (cm s⁻¹) sepanjang tempoh kajian.

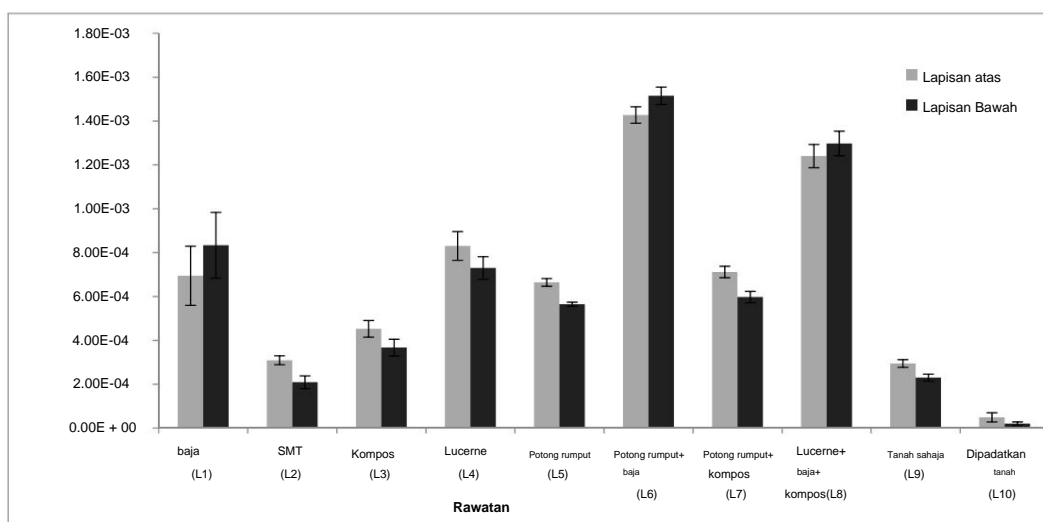
Rawatan	Jun 2014	Dis 2014	Jun 2015	Dis 2015
Baja (L1)	5.71 x 10 ⁻⁴ b	4.66 x 10 ⁻⁴ cd	6.62 x 10 ⁻⁴ bc	6.95 x 10 ⁻⁴ c
SMT (L2)	8.86 x 10 ⁻⁵ d	2.41 x 10 ⁻⁴ daripada	2.65 x 10 ⁻⁴ ef	3.09 x 10 ⁻⁴ d
Kompos (L3)	2.26 x 10 ⁻⁴ cd	4.15 x 10 ⁻⁴ cd	4.17 x 10 ⁻⁴ de	4.53 x 10 ⁻⁴ d
Lucerne (L4)	6.18 x 10 ⁻⁴ b	7.15 x 10 ⁻⁴ b	7.47 x 10 ⁻⁴ b	8.30 x 10 ⁻⁴ c
Rumput (L5)	4.11 x 10 ⁻⁴ bc	5.12 x 10 ⁻⁴ bc	5.48 x 10 ⁻⁴ cd	6.64 x 10 ⁻⁴ c
Rumput + baja (L6)	1.22 x 10 ⁻³ a	1.27 x 10 ⁻³ a	1.34 x 10 ⁻³ a	1.43 x 10 ⁻³ a
Rumput + kompos (L7)	5.14 x 10 ⁻⁴ b	4.93 x 10 ⁻⁴ bc	5.81 x 10 ⁻⁴ c	7.12 x 10 ⁻⁴ c
Lucerne + baja + kompos (L8)	1.15 x 10 ⁻³ a	1.17 x 10 ⁻³ a	1.22 x 10 ⁻³ a	1.24 x 10 ⁻³ b
Tanah sahaja (L9)	1.95 x 10 ⁻⁴ cd	2.55 x 10 ⁻⁴ d	2.26 x 10 ⁻⁴ f	2.95 x 10 ⁻⁴ d
Tanah padat (L10)	2.43 x 10 ⁻⁵ d	1.97 x 10 ⁻⁵ e	2.74 x 10 ⁻⁵ g	4.88 x 10 ⁻⁵ e
SEM	5.41 x 10 ⁻⁵	4.84 x 10 ⁻⁵	3.15 x 10 ⁻⁵	3.67 x 10 ⁻⁵

Bermakna dengan huruf yang sama dalam lajur tidak jauh berbeza.

Menjelang akhir kajian, pengukuran kekonduksian hidraulik telah dijalankan kedua-duanya dalam lapisan atas 5 cm dan bawah 5 cm (Rajah 4). Tiada kekonduksian hidraulik yang ketara perbezaan ($p > 0.05$) antara dua lapisan kecuali rawatan baja (L1). Lapisan bawah rawatan L1 adalah jauh lebih tinggi ($p < 0.05$) berbanding lapisan atas.

Menjelang akhir kajian, pengukuran kekonduksian hidraulik telah dijalankan dalam kedua-dua lapisan atas 5 cm dan bawah 5 cm (Rajah 4). Tiada perbezaan kekonduksian hidraulik Kelestarian 2019, 11, 4297 yang ketara ($p > 0.05$) antara kedua-dua lapisan kecuali untuk rawatan baja (L1). Lapisan bawah rawatan L1 adalah jauh lebih tinggi ($p < 0.05$) daripada lapisan atas.

12 daripada 17



Rajah 4. Kekonduksian hidraulik lapisan atas dan lapisan bawah bagi rawatan yang berbeza. SMT = rawatan lombong standard.

4. Perbandingan

4.1. Ketumpatan pukal

Ketumpatan pukal tanah berbeza-beza berdasarkan sebahagian besarnya pada tekstur tanah dan taburan pemadatan tanah. Untuk mencirikan keadaan pemadatan lapisan tanah, ketumpatan pukal dan jumlah keliangan adalah yang paling banyak parameter yang kerap digunakan. Secara amnya, ketumpatan pukal meningkat apabila masa berlalu akibat daripada pemadatan semula jadi tanah, dengan ketumpatan pukal tertinggi bagi setiap rawatan direkodkan pada penghujung tempoh belajar. Mengekalkan jumlah bahan organik yang mencukupi menstabilkan struktur tanah dan membuat tempoh. Mengekalkan jumlah bahan organik yang mencukupi menstabilkan struktur tanah dan membuat tempoh. Walau bagaimanapun, kadar tanah bahan organik terpadat sangat penting dalam menstabilkan struktur tanah. Bahan organik yang terpadat adalah sangat ketumpatan pukal rawatan baja (L1) meningkat dalam tempoh yang singkat terutamanya disebabkan oleh kadar peningkatan rawatan baja yang lebih singkat. Semasa tempoh yang singkat terpadat yang disebabkan oleh kadar pemadatan yang lebih cepat dalam ketumpatan pukal tanah Merwin Esse et al. [27] penggunaan air pada tanah yang dirawat dengan baja. Selepas pemadatan, tanah dipadatkan dengan mudah membolehkan kadar pemadatan pukal tanah yang lebih tinggi. Ketumpatan pukal Merwin Esse et al. [27], penggunaan air pada tanah yang dirawat dengan baja ditambah baik rawatan dalam kajian ini, ini boleh membantu dalam mempercepatkan penguraian baja dalam pecahan bahan organik yang ada. Oleh kerana air digunakan untuk semua rawatan dalam kajian ini, rawatan L1. Secara amnya, komponen organik dalam pindaan tanah mempunyai kesan pencairan yang mengakibatkan ini boleh membantu dalam mempercepatkan penguraian baja dalam pindaan tanah. Dalam kajian kami, rawatan dengan campuran komponen organik pindaan (L8) dalam pindaan tanah mempunyai kesan pencairan yang mengakibatkan penurunan pukal tanah. Dalam kajian kami, rawatan dengan campuran pindaan (L8) merekodkan tanah yang lebih rendah dalam pindaan kompos mereput pada kadar yang lebih perlahan daripada baja [29]. Kehadiran kompos dalam ketumpatan pukal kerana kesan pencairan rawatan L8 membantu mengekalkan ketumpatan pukal yang lebih rendah yang direkodkan dalam pindaan kompos ini kerana pada kadar yang lebih perlahan daripada baja [26]. Kehadiran kompos dalam campuran L8 ke semasa rawatan membantu mengekalkan ketumpatan pukal yang lebih rendah yang direkodkan dalam rawatan. Ini mengesahkan bahawa penambahan pindaan penguraian yang perlahan boleh mengurangkan kadar pemadatan dari semasa ke semasa.

4.2. Keluk Pengekalan Air Tanah dan Keliangan Keseluruhan

4.2. Keluk Pengekalan Air Tanah dan Keliangan Keseluruhan
Keluk pengekalan air tanah menerangkan hubungan antara kandungan air isipadu tanah dan ketegangan air tanah [21]. Nilai kemasukan udara (h_A) rawatan baja (L1) adalah lebih tinggi. Keluk pengekalan air tanah menerangkan hubungan antara kandungan air isipadu tanah. Nilai kemasukan udara (h_A) rawatan baja (L1) adalah lebih tinggi dalam lapisan atas daripada di lapisan bawah (Rajah 1a), menunjukkan kawasan kemasukan udara yang luas. Ini dan ketegangan air tanah [21]. Nilai kemasukan udara (h_A) rawatan baja (L1) adalah lebih tinggi dalam lapisan atas daripada lapisan bawah (Rajah 1a), menunjukkan kawasan kemasukan udara yang luas. Ini menunjukkan bahawa baja di lapisan atas terurai pada kadar yang lebih cepat berbanding dengan lapisan bawah yang terhasil tanah untuk padat dengan mudah. Nilai kemasukan udara (h_A) bagi kedua-dua lapisan dalam rawatan L2, L9 dan L10 ialah juga tinggi (Rajah 1b,i,j), menunjukkan bahawa tanah itu dipadatkan kerana kesemuanya mempunyai kawasan kemasukan udara yang luas dalam SWRC. Rantau kapilari, yang berkaitan dengan air tersedia tumbuhan, mengalami penurunan mendadak kecerunan lengkung untuk rawatan L2, L9, dan L10 (Rajah 1b,i,j). Sebaliknya, rawatan yang telah gabungan pindaan (L6, L7, dan L8) mempunyai cerun rantau kapilari yang lembut (Rajah 1f-h). Cerun daripada

lekung pengekal menyediakan ukuran kadar air mengalir dari tanah apabila tekanan sedutan meningkat daripada nilai kemasukan udara kepada kandungan air baki [9]. Ini menunjukkan bahawa tumbuhan yang tumbuh di bawah rawatan L2, L9 dan L10 akan mengalami defisit air lebih awal disebabkan kapasiti simpanan air yang lebih rendah berbanding dengan yang ditanam di bawah rawatan L6, L7 dan L8. Bahan organik menyebabkan tanah bergumpal dan membentuk agregat, memperbaiki struktur tanah dan keupayaannya untuk menyimpan lebih banyak air, seterusnya meningkatkan kandungan air isipadu tanah. Dalam kajian yang dijalankan oleh Minasny dan McBratney [30], penambahan 1% karbon organik meningkatkan kandungan air tanah masing-masing sebanyak 2.95, 1.61, 0.17, dan 1.16% pada ketepuan, kapasiti medan, takat layu, dan kapasiti air yang tersedia. Apabila bahan organik dalam tanah terurai, tanah kehilangan strukturnya akibat daripada penurunan bilangan agregat tanah yang stabil air [31], justeru menjejaskan keliangan dengan teruk. Ini membawa kepada pemadatan dan mengurangkan kapasiti pegangan air tanah.

Dalam kajian ini, tanah yang dirawat dengan pindaan mempunyai kandungan air isipadu yang lebih tinggi daripada tanah yang tidak dirawat. Ini adalah selaras dengan kajian yang dijalankan oleh Mi et al. [32], yang melaporkan peningkatan ketara dalam sifat fizikal tanah dan kandungan air tanah dalam tanah yang dipinda dengan bentonit. Penambahan pindaan telah mengurangkan ketumpatan pukal tanah dengan ketara (Jadual 2). Ini meningkatkan ruang liang dalam tanah, membolehkan tanah menyimpan lebih banyak air. Pemadatan tanah mengurangkan kapasiti tanah untuk menyimpan air, yang bergantung terutamanya kepada keliangan tanah. Separuh daripada solekan tanah yang sihat adalah ruang liang, dengan separuh lagi terdiri daripada fasa pepejal (zarah mineral dan bahan organik). Penambahan pindaan dalam kajian semasa meningkatkan jumlah keliangan. Ini selari dengan kajian yang dijalankan oleh Celik et al. [34] yang melaporkan bahawa penambahan baja dan kompos meningkatkan jumlah keliangan masing-masing sebanyak 18% dan 24%, melalui pembentukan pengagregatan tanah. Ruang pori menyediakan ruang untuk udara dan air beredar di antara dan di sekeliling zarah mineral, menyediakan persekitaran yang sihat untuk akar tumbuhan dan mikroorganisma yang bermanfaat. Walau bagaimanapun, dalam tanah yang padat dan kurang berliang, zarah-zarah ditekan bersama-sama dengan begitu ketat sehingga ruang untuk udara dan air sangat berkurangan.

4.3. Taburan Saiz Liang

Taburan saiz liang tanah adalah kelimpahan relatif setiap saiz liang yang terdapat dalam isipadu tanah tertentu [35]. Semua rawatan dicirikan sebagai uni-modal, dinyatakan dengan kewujudan satu titik infleksi pada lekung pengekal, yang bertepatan dengan puncak pada lekung terbitan JPA kepada lekung pengekal [36]. Hampir separuh daripada liang untuk rawatan baja (L1) dan SMT (L2) mempunyai jejari liang 40–500 μm manakala rawatan tanah yang dipadatkan, L10, mencatatkan bahagian yang lebih besar daripada jejari liang dalam julat 50–250 μm (Rajah 3a), menunjukkan bahagian makro-pori yang sangat rendah. Sebagai perbandingan, sebahagian besar jejari liang untuk rawatan tanah sahaja (L9) adalah dalam julat 40–350 μm . Keputusan ini menyokong dengan baik dengan bentuk lekung pengekal air tanah untuk rawatan ini. SWRC bagi rawatan L1, L2, L9 dan L10 menunjukkan penurunan mendadak dalam kawasan kapilari lekung (Rajah 1), yang mencerminkan taburan saiz liang. Rawatan padat (L10), yang mencerminkan keadaan semasa tanah lombong yang telah dipulihkan, mempunyai isipadu relatif liang jejari 150 μm dan lebih rendah isipadu liang jejari 150 μm dan lebih tinggi berbanding dengan tanah sahaja, yang dibiarkan mengendap secara semula jadi (L9). Sebaliknya, penggunaan SMT dan baja meningkatkan isipadu liang setiap jejari berbanding dengan L9. Julat saiz liang dalam rawatan ini mewakili meso-liang (10–1000 μm) [24]. Liang-liang ini, juga dirujuk sebagai liang simpanan [37], bertanggungjawab untuk menyimpan air untuk tumbuhan dan mikro-organisma. Oleh itu, mempunyai bahagian pori-pori yang tinggi akan meningkatkan air yang ada pada tumbuhan.

Sebilangan besar jejari liang untuk rawatan pindaan tunggal yang lain ialah: antara 40–1200 μm untuk kompos (L3), 50–1000 μm untuk lucerne (L4) dan 60–1400 μm untuk rumput (L5) (Rajah 3b). Ini menunjukkan bahawa rawatan L3, L4 dan L5 telah meningkatkan nisbah liang makro jika dibandingkan dengan rawatan L1, L2, L9 dan L10. Jelas daripada Rajah 3b bahawa rawatan L3, L4, dan L5 meningkatkan isipadu relatif liang jejari 136 μm dan lebih tinggi berbanding dengan L9, tetapi mempunyai sedikit kesan pada liang yang lebih rendah daripada jejari ini. Satu-satunya pengecualian adalah untuk tanah yang dipinda dengan rumput sahaja, yang mempunyai isipadu liang jejari yang agak rendah antara 147–183 μm berbanding dengan L9.

Sebilangan besar liang untuk campuran pindaan (L6, L7, dan L8) (Rajah 3c) berada dalam julat jejari liang 10–3500 μm . Liang dalam julat ini ($>1000 \mu\text{m}$) dipanggil makro-liang [24]. Liang-liang ini, juga dirujuk sebagai liang penghantaran [37], mempunyai kesan berguna pada penembusan akar dan pergerakan air. Hasilnya menunjukkan bahawa bahagian liang makro dalam rawatan ini adalah jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan rawatan pindaan tunggal di mana julat jejari liang yang lebih besar adalah dalam julat 40-1400 μm . Tidak seperti pindaan tunggal L3, L4, dan L5, gabungan pindaan meningkatkan isipadu relatif liang semua jejari. Kenaikan adalah lebih tinggi daripada L1 dan L2. Sumbangan kepada peningkatan isipadu relatif liang tanah (berbanding dengan L9) adalah lebih terpesong kepada jejari $>150 \mu\text{m}$ untuk L7, dan jejari $>100 \mu\text{m}$ untuk L6, manakala L8 meningkatkan perkadaran isipadu relatif liang daripada semua jejari hampir berkadar.

Peningkatan yang diperhatikan dalam isipadu relatif liang dalam jejari liang meso (10–1000 μm) adalah sebab bagi peningkatan PAW untuk rawatan L3, L4, L5, L6, L7, dan L8 (Jadual 3) berbanding dengan L1, L2, L9 dan L10. Antara gabungan pindaan, L8 mempunyai PAW tertinggi (130 mm m^{-1}), terutamanya kerana isipadu relatif liang yang lebih tinggi dalam jejari liang meso, terutamanya antara 10–100 μm , berbanding dengan rawatan lain. Dalam kajian semasa, taburan saiz liang telah diubah oleh pindaan organik. Ini disokong dalam kajian lepas kerana Pagliai dan Vittori Antisari [38] menyatakan bahawa kedua-dua keliangan mikro dan keliangan makro meningkat dengan penggunaan baja ternakan atau kompos.

4.4. Penyusupan dan Kekonduksian Hidraulik

Kapasiti penyusupan, ditakrifkan sebagai kadar maksimum di mana air boleh diserap oleh tanah, berkurangan dengan cepat dari semasa ke semasa [39]. Interaksi yang berlaku antara bulan x rawatan adalah terutamanya kerana penyusupan kumulatif berkurangan dengan masa akibat daripada peningkatan ketumpatan pukal (Jadual 2). Penyusupan kumulatif berkurangan dengan masa dengan penyusupan terendah bagi setiap rawatan yang direkodkan pada akhir tempoh kajian (Jadual 5). Ini selari dengan kajian yang dijalankan oleh Horton [39]. Secara amnya, tanah terpinda mempunyai penyusupan kumulatif yang lebih tinggi berbanding dengan tanah L9 dan L10 yang tidak dirawat. Lajur yang dirawat dengan campuran pindaan mencatatkan penyusupan terkumpul tertinggi ($p < 0.01$). Ini disebabkan terutamanya oleh peningkatan dalam bahagian liang makro kedua-dua lapisan atas dan bawah berbanding dengan semua rawatan lain (Rajah 2). Liang-makro memainkan peranan penting dalam kadar penyusupan tanah [40]. Kajian terdahulu menunjukkan bahawa penyusupan air telah berkurangan dengan teruk dalam tanah yang tidak berstruktur, padat dan terdegradasi [41]. Keputusan daripada kajian ini adalah selari dengan kajian lepas [41] kerana L9 dan L10 merekodkan kadar penyusupan yang rendah terutamanya disebabkan oleh bahagian makro-pori yang sangat rendah dan kadar mikro-pori yang tinggi di kedua-dua lapisan atas dan bawah (Rajah 2). Kadar penyusupan rendah yang direkodkan daripada L9 dan L10 mempunyai implikasi negatif terhadap hujan berkesan (hujan tolak air larian), manakala peningkatan kadar penyusupan rawatan yang dipinda menunjukkan peningkatan dalam hujan berkesan. Peningkatan kekonduksian hidraulik dalam bahan yang dipinda disebabkan oleh kehadiran bahagian makro-pori yang lebih tinggi (Rajah 2 dan 3b, c) akibat daripada ketumpatan pukal yang berkurangan. Kekonduksian hidraulik tepu biasanya meningkat dengan ketumpatan pukal yang berkurangan [13].

Sebaliknya, rawatan L9 dan L10 yang tidak dipinda mempunyai ketumpatan pukal yang lebih tinggi, peratusan liang makro yang lebih rendah dan bahagian liang mikro yang lebih tinggi (Rajah 3a), justeru kekonduksian hidraulik yang lebih rendah. Peningkatan yang dilaporkan dalam kekonduksian hidraulik bagi rawatan yang dipinda adalah selaras dengan keputusan yang diperolehi oleh Miranda et al. [42], yang melaporkan bahawa penambahan pindaan kepada tanah terdegradasi meningkatkan kekonduksian hidraulik kerana peningkatan berbangkit dalam bahagian liang makro, yang bertanggungjawab terutamanya untuk pergerakan air dalam tanah tepu. Adalah menarik untuk diperhatikan bahawa kekonduksian hidraulik tepu bagi pindaan rumput + baja (L6) adalah tertinggi walaupun mempunyai jumlah keliangan yang lebih rendah daripada lucerne + baja + kompos (L8). Ini disebabkan oleh isipadu relatif liang tertinggi dalam jejari liang makro ($>1000 \mu\text{m}$) berbanding dengan semua rawatan lain. Apabila kekonduksian hidraulik lapisan atas 5 cm dan bawah 5 cm dibandingkan, perbezaan yang ketara diperhatikan dalam rawatan baja (L1). Sebabnya adalah lebih cepat

penguraian baja apabila terdedah kepada suhu yang lebih tinggi yang dialami di permukaan tanah berbanding lapisan bawah.

Ringkasnya, pada akhir kajian dua tahun, rawatan dengan satu pindaan merekodkan kepadatan pukal tanah yang lebih tinggi daripada rawatan dengan campuran pindaan seperti ditunjukkan dalam Jadual 2.

Ketumpatan pukal tanah yang lebih tinggi mempunyai kesan ke atas keliangan dan pengekal air tanah, kerana lebih sedikit air yang disimpan dalam rawatan dengan satu pindaan. Kesan ketumpatan pukal tanah yang lebih tinggi jelas ditunjukkan dalam taburan saiz liang kerana rawatan dengan ketumpatan pukal tanah yang lebih tinggi mempunyai lebih banyak liang mikro dan sedikit liang makro (Rajah 2). Tanah yang dipadatkan (L10), yang dicirikan oleh ketumpatan pukal yang lebih tinggi, mempunyai JPA paling sedikit dan liang makro yang lebih sedikit. Lintang-makro penting untuk pengudaraan tanah dan secara amnya dirujuk sebagai liang penghantaran [40,43] di mana air bergerak bebas di bawah graviti. Lintang-liang ini penting dalam hubungan tanah-tumbuhan-air dan mengekalkan struktur tanah yang baik [44]. Memandangkan ini, tanaman yang ditanam dengan rawatan L1, L2, L9, dan L10 akan mengalami kekurangan air dan akar akan sukar untuk menembusi tanah [45].

Rawatan kompos (L3), lucerne (L4), dan rumput (L5), bagaimanapun, mempunyai lebih banyak liang makro berbanding dengan rawatan L1, L2, L9 dan L10 (Rajah 2). Sebabnya adalah disebabkan oleh kadar keterdegradasian yang lebih besar dan perlahan bagi bahan pindaan yang meningkatkan jumlah isipadu tanah, seterusnya mengurangkan ketumpatan pukal dan meningkatkan jumlah keliangan, terutamanya pecahan liang makro. Jika dibandingkan dengan rawatan L9, rawatan L3, L4, dan L5 mempunyai bahagian makro-pori yang lebih besar (Rajah 2), yang boleh membantu tumbuhan yang ditanam di dalam tanah sedemikian kepada akses yang lebih baik kepada air dan penembusan akar yang lebih dalam. Semua kesan di atas (ketumpatan pukal, keliangan, pengekal air tanah, dan taburan saiz liang) memainkan peranan penting dalam kadar penyusupan. Rawatan dengan satu pindaan merekodkan kadar penyusupan yang lebih rendah. Sekiranya kadar penyusupan rendah, akan berlaku peningkatan dalam kehilangan larian, seterusnya mengurangkan hujan berkesan. Jelas sekali, gabungan pindaan menunjukkan prestasi yang lebih baik daripada rawatan lain dari segi ketumpatan pukal, keliangan dan taburan saiz liang. Memerhatikan bentuk lengkung pengekal (terutamanya di kawasan kapilari lengkung) untuk gabungan pindaan (Rajah 1), kecerunan lengkung secara amnya lembut berbanding rawatan lain yang menunjukkan taburan saiz liang yang lebih tinggi. Taburan saiz liang yang lebih tinggi adalah petunjuk penyimpanan air yang tersedia pada tumbuhan yang lebih tinggi kerana air akan disimpan dalam kecerunan saiz liang, yang akan dikeluarkan secara beransur-ansur apabila sedutan ma

5. Kesimpulan

Pertumbuhan rumput dalam tanah lombong tebus guna, sebahagian besarnya, tidak berjaya walaupun terdapat pelbagai campur tangan termasuk pembajaan terutamanya disebabkan oleh kemerosotan sifat fizikal tanah. Kajian dua tahun menunjukkan bahawa rawatan lombong standard tidak bertahan lama seperti yang diperhatikan juga di tanah di tanah tebus guna. Ameliorasi dengan gabungan pindaan dapat meningkatkan sifat fizikal tanah yang termasuk mengurangkan ketumpatan pukal tanah sebanyak 12–18%, mengurangkan nilai kemasukan udara sebanyak 6–12%, meningkatkan ketersediaan air tumbuhan sebanyak 35–40%, dan meningkatkan kadar penyusupan. sebanyak 24%. Titik infleksi untuk kekerapan pengagihan liang rawatan dengan campuran pindaan adalah lebih tinggi jika dibandingkan dengan tanah yang tidak dirawat, mencadangkan peningkatan dalam jumlah penyimpanan dan liang penghantaran. Penambahan campuran pindaan secara amnya meningkatkan ketumpatan pukal tanah, keliangan, taburan saiz liang dan air yang tersedia untuk tumbuhan ke tahap yang lebih sesuai untuk pembangunan tumbuhan.

Sumbangan Pengarang: Konseptualisasi, WT; Analisis formal, AA; Pemerolehan pembiayaan, WT; Penyiasatan, AA; Metodologi, AA dan ET; Pentadbiran projek, WT; Penyelidikan, ET dan WT; Penulisan— draf asal, AA; Penulisan— semakan & penyuntingan, ET dan WT

Pembiayaan: Penyelidikan ini dibiayai oleh Persatuan Penyelidikan Coaltech (Tajuk projek: INISIATIF PENYELIDIKAN PEMADATAN/MITIGASI: Pencegahan Pematatan Tanah melalui Pemeliharaan Tanah Atas/Sub Tanah sebelum diletakkan sebagai medium pertumbuhan untuk penutup tumbuh-tumbuhan), nombor geran 8.2.4.

Penghargaan: Penulis berterima kasih kepada Marie Smith kerana membantu dengan analisis statistik. Bantuan pengulas tanpa nama dalam menyunting artikel juga diakui.

Konflik Kepentingan: Pengarang mengisytiharkan tiada konflik kepentingan.

Rujukan

1. Rocha-Nicoleite, E.; Overbeck, G.; Müller, S. Degradasi oleh perlombongan arang batu harus menjadi keutamaan dalam pemulihan perancangan. *Perspek. Ecol. Pemuliharaan*. **2017**, *15*, 202–205. [[CrossRef](#)]
2. Dejun, Y.; Zhengfu, B.; Shaogang, L. Kesan ke atas kualiti fizikal tanah oleh penenggelaman perlombongan arang batu: Kajian kes di China Barat. *alam sekitar. Sains Bumi*. **2016**, *75*, 652–665. [[CrossRef](#)]
3. Neina, D.; Buerkert, A.; Joergensen, R. Kesan penggunaan tanah pada indeks mikrob dalam tanah lombong tantalite, Barat Rwanda. *Tanah Degrad. Dev*. **2016**, *28*, 181–188. [[CrossRef](#)]
4. Mushia, N.; Ramoelo, A.; Ayisi, K. Kesan kualiti tanah simpanan lombong arang batu terhadap pertumbuhan dan produktiviti tumbuhan yang mampan. *Kelestarian* **2016**, *8*, 546–558. [[CrossRef](#)]
5. Berisso, FE; Schjønning, P.; Keller, T.; Lamande, M.; Etana, A.; de Jonge, LW; Iversen, BV; Arvidsson, J.; Forkman, J. Kesan berterusan pemadatan tanah bawah pada taburan saiz liang dan pengangkutan gas dalam tanah berlempung. *Pengolahan Tanah Res*. **2012**, *122*, 42–51. [[CrossRef](#)]
6. Lipiec, J.; Kus, J.; Sýowin'ska-Jurkiewicz, A.; Nosalewicz, A. Keliangan tanah dan penyusutan air seperti yang dipengaruhi oleh kaedah pembajakan. *Pengolahan Tanah Res*. **2006**, *89*, 210–220. [[CrossRef](#)]
7. Kutý'lek, M. Sifat hidraulik tanah yang berkaitan dengan struktur tanah. *Pengolahan Tanah Res*. **2004**, *79*, 175–184. [[CrossRef](#)]
8. Czyz, EA Kesan trafik pada pengudaraan tanah, ketumpatan pukal dan pertumbuhan barli musim bunga. *Pengolahan Tanah Res*. **2004**, *79*, 153–166. [[CrossRef](#)]
9. Fredlund, DG; Houston, SL Tafsiran lengkung ciri tanah-air apabila perubahan isipadu berlaku apabila sedutan tanah diubah. Secara Terdahulu dalam *Tanah Tak Tepu; Akhbar CRC: Boca Raton, FL, Amerika Syarikat, 2013; ms 15–31.*
10. Seluar, PK; Ram, S. Kesan pembajaan dan pembajaan jangka panjang pada sifat fizikal tanah selepas empat puluh dua kitaran di bawah sistem beras-gandum di Mollisols India Utara. *Int. J. Curr. mikrobiol. Aplikasi. Sci*. **2018**, *7*, 232–240. [[CrossRef](#)]
11. Ozores-Hampton, M.; Stansly, PA.; Salame, TP. Sifat kimia tanah, fizikal dan biologi tanah berpasir tertakluk kepada pindaan organik jangka panjang. *J. Sustain. Agric*. **2011**, *35*, 243–259. [[CrossRef](#)]
12. Cele, EC; Maboeta, M. Percubaan rumah hijau untuk menyasat sifat amelioratif biopepejal dan tumbuhan pada keadaan fizikokimia tailing bijih besi: Implikasi untuk pemulihan tapak lombong bijih besi. *J. Mengenai. Manag*. **2016**, *165*, 167–174. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Yazdanpanah, N.; Mahmoodabadi, M.; Cerdà, A. Kesan pindaan organik terhadap hidrologi tanah, struktur dan respirasi mikrob di tanah separa gersang. *Geoderma* **2016**, *266*, 58–65. [[CrossRef](#)]
14. Mohammadshirazi, F.; McLaughlin, R.; Heitman, J.; Brown, V. Kajian berbilang tahun tentang kesan pembajakan dan pindaan pada tanah yang dipadatkan. *J. Alam Sekitar. Manag*. **2017**, *203*, 533–541. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Sánchez, Ó.; Ospina, D.; Montoya, S. Suplemen kompos dengan nutrien dan mikroorganisma dalam proses pengkomposan. *Waste Manag*. **2017**, *69*, 136–153. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Kumpulan Kerja Pengelasan Tanah. *Klasifikasi Tanah: Sistem Taksonomi untuk Afrika Selatan*; Jabatan Pembangunan Pertanian: Pretoria, Afrika Selatan, 1991.
17. Truter, WF; (Universiti Pretoria, Pretoria, Afrika Selatan). *Komunikasi peribadi*, 2013.
18. Dyson, LL; Van Heerden, J.; Marx, HG Teknik Ramalan Jangka Pendek untuk Hujan Lebat; Laporan WRC Bil. 1011/1/02; Suruhanjaya Penyelidikan Air: Pretoria, Afrika Selatan, 2002.
19. Zhang, R. Penentuan daya serap tanah dan kekonduksian hidraulik daripada meter infiltrometer cakera. *Sains Tanah. Soc. Am. J*. **1997**, *61*, 1024–1030. [[CrossRef](#)]
20. Van Genuchten, MT Persamaan bentuk tertutup untuk meramalkan kekonduksian hidraulik tanah tak tepu. *Sains Tanah. Soc. Am. J*. **1980**, *44*, 892–898. [[CrossRef](#)]
21. Van Genuchten, MT; Leij, FJ; Yates, SR Kod RETC untuk Mengukur Fungsi Hidraulik Tanah Tak Tepu; Dokumen EPA/600/2-91/065; US Salinity Laboratory, USDA: Riverside, CA, USA, 1991; hlm. 85.
22. Mualem, Y. Kekonduksian hidraulik tanah tak tepu: Ramalan dan formula. Dalam *Kaedah Analisis Tanah. I. Kaedah Fizikal dan Mineralogi; Persatuan Sains Tanah Amerika; Persatuan Agronomi Amerika: Madison, WI, Amerika Syarikat, 1986; Jilid 9, hlm. 799–823.*
23. Kutý'lek, M.; Nielsen, DR *Hidrologi Tanah*; Catena Verlag: Cremlingen, Jerman, 1994.
24. Luxmoore, RJ Mikro, meso, dan keliangan makro tanah. *Sains Tanah. Soc. Am. J*. **1981**, *45*, 671–672. [[CrossRef](#)]
25. Snedecor, GW; Cochran, *Kaedah Perangkaan WG*, ed. ke-7; Iowa State University Press: Iowa City, IA, Amerika Syarikat, 1980; hlm. 507.

26. Payne, RW; Murray, DA; Harding, SA; Baird, DB; Soutar, DM Pengenalan kepada Genstat ® untuk Windows™, ed. ke-18; VSN Antarabangsa: Hemel Hempstead, UK, 2015.
27. Esse, PC; Buerkert, A.; Hiernaux, P.; Assa, A. Penguraian dan pembebasan nutrien daripada baja ruminan pada tanah berpasir asid di zon Sahelian di Niger, Afrika Barat. *Agric. Ekosis. alam sekitar*. **2001**, 83, 55–63. [\[CrossRef\]](#)
28. Bronick, CJ; Lal, R. Struktur dan pengurusan tanah: Kajian semula. *Geoderma* **2005**, 124, 3–22. [\[CrossRef\]](#)
29. Al Chami, Z.; Bou Zein Eldeen, S.; Al Bitar, L.; Atallah, T. Penguraian kompos sisa kilang zaitun, baja kambing dan Medicago sativa di tanah Lubnan seperti yang diukur menggunakan teknik litterbag. *Tanah Res.* **2016**, 54, 191–199. [\[CrossRef\]](#)
30. Minasny, B.; McBratney, AB Kesan terhadap bahan organik pada kapasiti air tanah yang tersedia. *Eur. J. Sci Tanah.* **2017**, 69, 39–47. [\[CrossRef\]](#)
31. Tisdall, JM; Oades, JM Bahan organik dan agregat stabil air dalam tanah. *J. Sci Tanah.* **1982**, 33, 141–163. [\[CrossRef\]](#)
32. Mi, J.; Gregorich, EG; Xu, S.; McLaughlin, NB; Ma, B.; Liu, J. Kesan pindaan bentonit pada parameter hidraulik tanah dan prestasi tanaman millet di kawasan separa gersang. *Res Tanaman Ladang.* **2017**, 212, 107–114. [\[CrossRef\]](#)
33. Schoonover, JE; Crim, JF Pengenalan kepada konsep tanah dan peranan tanah dalam pengurusan tadahan air. *J. Menghina. Air Res. Edu.* **2015**, 154, 21–47. [\[CrossRef\]](#)
34. Celik, I.; Ortas, I.; Kilic, S. Kesan kompos, mikoriza, baja dan baja ke atas beberapa sifat fizikal tanah Chromoxert. *Pengolahan Tanah Res.* **2004**, 78, 59–67. [\[CrossRef\]](#)
35. Nimmo, JR Porosity dan taburan saiz liang. Dalam *Ensiklopedia Tanah dalam Alam Sekitar; Lain-lain: London, UK, 2004; Jilid 3, hlm. 295–303.*
36. Kutýlek, M.; Jendele, L.; Panayiotopoulos, K. Pengaruh mampatan uniaxial pada saiz liang pengedaran dalam tanah dwimodal. *Pengolahan Tanah Res.* **2006**, 86, 27–37. [\[CrossRef\]](#)
37. Pagliai, M.; Vignozzi, N. Sistem liang tanah sebagai penunjuk kualiti tanah. *Adv. Geo. Ecol.* **2002**, 35, 69–80.
38. Pagliai, M.; Vittori Antisari, L. Pengaruh bahan organik sisa ke atas struktur mikro dan makro tanah. *Bioresour. Technol.* **1993**, 43, 205–213. [\[CrossRef\]](#)
39. Horton, R. Satu pendekatan ke arah tafsiran fizikal kapasiti penyusutan. *Sains Tanah. Soc. Am. Proc.* **1940**, 5, 339–417.
40. Kay, BD; VandenBygaert, AJ Pembajakan pemuliharaan dan stratifikasi kedalaman keliangan dan organik tanah perkaru. *Pengolahan Tanah Res.* **2002**, 66, 107–118. [\[CrossRef\]](#)
41. Lal, R. Memulihkan kualiti tanah untuk mengurangkan kemerosotan tanah. *Kelestarian* **2015**, 7, 5875–5895. [\[CrossRef\]](#)
42. Miranda, M.; Freire, M.; Almeida, B.; Freire, A.; Freire, F.; Pessoa, L. Penambahbaikan sifat fizikal terdegradasi tanah masin-sodik seperti yang dipengaruhi oleh fitoremediasi dan perapi tanah. *Gerbang. Agron. Sains Tanah.* **2018**, 64, 1–15. [\[CrossRef\]](#)
43. Greenland, DJ Pengurusan tanah dan degradasi tanah. *J. Sci Tanah.* **1981**, 32, 301–322. [\[CrossRef\]](#)
44. Bhattacharyya, R.; Prakash, V.; Kundu, S.; Gupta, H. Kesan pembajakan dan putaran tanaman ke atas taburan saiz liang dan konduksian hidraulik tanah dalam tanah liat tanah liat berpasir di Himalaya India. *Pengolahan Tanah Res.* **2006**, 82, 129–140. [\[CrossRef\]](#)
45. Pagliai, M.; Raglione, M.; Panini, T.; Maletta, M.; La Marca, M. Struktur tanah selepas sepuluh tahun pembajakan konvensional dan minimum dua tanah Itali. *Pengolahan Tanah Res.* **1995**, 34, 209–223. [\[CrossRef\]](#)

